

Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 2016

Sonderdruck  
Seiten 269–283



J. CRAMER Verlag · Braunschweig  
2017

## Über die Anziehungskraft der Erde\*

REINER RUMMEL

Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München,  
Arcisstraße 21, D-80333 München, E-Mail: rummel@bv.tum.de

Sehr geehrter Herr Professor Brandes, sehr geehrter Herr Oberbürgermeister, werte Kollegen, sehr verehrte Damen und Herren,

Es freut mich außerordentlich, von Ihnen, von der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft mit der Gauß-Medaille ausgezeichnet zu werden. Gleichzeitig macht es mich natürlich auch verlegen, eine Medaille zu erhalten, die den Namen des großen Gauß trägt.

Gauß war ein genialer Denker, mit seinem Werk schuf er wesentliche Fundamente der modernen Mathematik, aber auch der Astronomie, Himmelsmechanik, Geodäsie und der Erforschung des Erdmagnetfelds (Klein, 2007; Mania, 2008). Seine Beschäftigung mit der Geodäsie war nur *eine* Episode seines Schaffens, dennoch vermochte Gauß der Geodäsie entscheidende Impulse zu geben. Eines der großen wissenschaftlichen Themen der damaligen Zeit war die Bestimmung der Erdfigur. Im Zusammenhang mit seinen geodätischen und astronomischen Messungen in den Jahren 1821–1824 an einer Dreieckskette, die die Sternwarten in Göttingen und Altona verband, gab Gauß als erster im deutschen Sprachraum eine klare Definition des Begriffs der geometrischen Figur der Erde. Im Jahr 1828 schreibt Gauß: *„Was wir im geometrischen Sinn Oberfläche der Erde nennen, ist nichts anderes als diejenige Fläche, welche überall die Richtung der Schwere senkrecht schneidet, und von der die Oberfläche des Weltmeeres einen Theil ausmacht.“* Es geht also nicht um die physische Erdoberfläche, so wie wir sie sehen, sondern um die rein durch die Schwerkraft definierte Erdfigur, deren Oberfläche auf den Meeren mit einer ruhend gedachten Ozeanfläche zusammenfällt und die man sich unter den Kontinenten fortgesetzt denken sollte. Listing (1873) prägte für diese „geometrische Figur der Erde“ den Begriff Geoid. Das Geoid ist eine Äquipotential- oder Niveaulfläche des Schwerefelds, eine die ganze Erde umspannende Horizontalfläche. Die wissenschaftliche Frage der damaligen

---

\* Der Vortrag wurde am 29.04.2016 anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille durch die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft gehalten.

Zeit war dabei, ob – und wenn ja, in welchem Maße – das Geoid von einem mit der Erde rotierenden Ellipsoid in hydrostatischem Gleichgewicht abweicht. Ich werde darauf noch näher eingehen.

Der Titel meines Beitrags lautet „Über die Anziehungskraft der Erde“. Abbildung 1 zeigt ein weitgehend unbekanntes Gemälde von Salvador Dalí. Was stellt es dar? Man sieht einen Apfel, der Apfel gilt seit Newton als Symbol für Gravitation. Er wird durch geheimnisvolle Kräfte, die offenbar von den dargestellten vier den Apfel umringenden Marmorblöcken ausgehen in einem Schwebezustand gehalten.

Vielleicht inspiriert durch dieses Bild wurde in den sechziger Jahren ein neuartiger Typ Schweremesser entwickelt, der dieses Prinzip in die Realität umsetzt (Prothero & Goodkind, 1968). Es ist ein supraleitendes Gravimeter. Dabei wird eine supraleitende, sphärische Testmasse in einem Magnetfeld in einem perfekten schwebenden Ruhezustand gehalten, Abbildung 2. Die Schwerkraft selbst, aber auch jede Schwankung der Erdanziehung, durch zum Beispiel die Gezeitenwirkung von Sonne, Mond und Planeten wird auf weniger als ein Milliardstel der Erdanziehung kompensiert.

Mit diesem Ansatz lassen sich extrem kleine Veränderungen der Erdanziehung, z.B. durch herabfallenden Schnee oder als Folge von Schwankungen des Grundwasserspiegels bzw. der Bodenfeuchte erfassen. Es konnte auf der Messstation Wettzell im Bayerischen Wald gezeigt werden, dass mit diesem Instrument lokale Schwankungen der Erdanziehung weit genauer und repräsentativer erfasst werden können als mit einem Lysimeter, einer sehr aufwändigen Apparatur, die in der Hydrologie verwendet wird (Creutzfeldt u.a., 2008).

Man könnte Dalís Gemälde, Abbildung 1 jedoch auch anders interpretieren: die fünf dargestellten Massen, der Apfel und die vier Marmorblöcke, fallen allesamt; sie sind unmittelbar vor ihrem Aufprall auf der Erde dargestellt. Dies entspräche Einsteins berühmtem Gedankenexperiment eines fallenden Aufzugs, mit dem er die Äquivalenz von träger und schwerer Masse veranschaulicht hat. Der Schattenwurf des Gemäldes gestattet nicht zu entscheiden, welche der beiden Deutungen die zutreffende ist.

Auch zu dieser zweiten Deutung gibt es ein physikalisches Experiment. Im Jahr 1975 lancierte die französische Weltraumorganisation CNES einen Satelliten, in dessen Inneren eine kugelförmige Probemasse schwebend gehalten wurde, Abbildung 3. Ein Satellit, in seiner Umlaufbahn um die Erde, befindet sich im freien Fall (dies wurde schon von Newton gezeigt): der Satellit ist also in seiner Bahnbewegung ein im Gravitationsfeld frei um die Erde fallender Körper. Das gleiche gilt für die Probemasse in seinem Inneren. Doch während der freie Fall des Satelliten durch die Atmosphäre in seiner Bewegung gestört wird (auch in einer Satellitenhöhe von hier zwischen 300 km im Perigäum und 1290 km im Apogäum macht sich noch eine Restatmosphäre bemerkbar), bewegt sich die

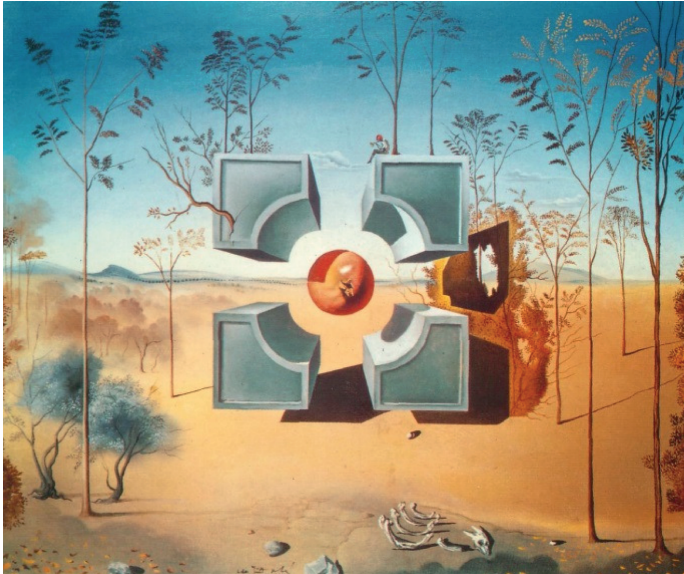


Abbildung 1: Gemälde von Salvador Dalí „Sans Titre“  
© Salvador Dalí, Fundació Gala-Salvador Dalí, Figueres, 2011



Abbildung 2: Supraleitendes Gravimeter der Firma GWR Instruments, Inc.



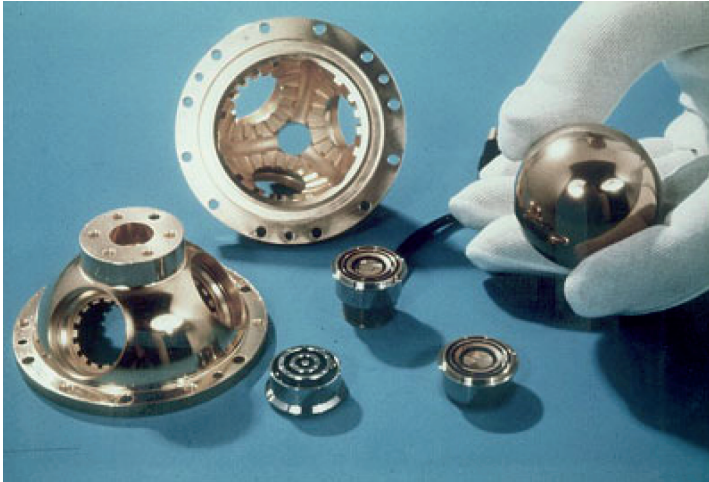


Abbildung 3: Mikroakzelerometer „Cactus“ mit sphärischer Testmasse; gebaut durch Onera/Paris für den Satelliten CNES CASTOR (D5B), 1975 (Bernard A., J.P. Canny, R. Juillerat, P. Touboul, *Acta Astronautica*, 1985).

Probemasse im Inneren ungestört. Aus diesem differentiellen Effekt konnte die Bremswirkung der Erdatmosphäre abgeleitet und in einem weiteren Schritt ein Modell der Atmosphärendichte erstellt werden.

Das Prinzip lässt sich auch umkehren: kennt man die Bremswirkung der Atmosphäre, so folgt hieraus die ungestörte Bahnbewegung des Satelliten und in einem weiteren Schritt das Gravitationsfeld der Erde. Die erfolgreiche Anwendung dieses Prinzips musste bis zum Jahr 2000 warten und wurde erstmals mit der deutschen Satellitenmission CHAMP erprobt (Reigber u.a., 2002). Denn erst zu dieser Zeit wurde es möglich, mit den Satelliten des Globalen Satellitennavigationssystems GPS die Bahn des erdnahen Satelliten CHAMP aus großer Höhe sehr genau, ununterbrochen und dreidimensional zu vermessen, Abbildung 4.

Da die Anziehungskraft der Erde jedoch mit zunehmender Höhe über der Erdoberfläche abnimmt, nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz mit dem Quadrat des Abstands, erhält man aus den Satellitenbahnen nur ein sehr abgeschwächtes Abbild der Erdanziehung, Details sind nicht erkennbar. Dies ist das zentrale Dilemma jeder Bestimmung der Erdanziehung mit Satelliten und beschäftigt Geodäten und Physiker bereits seit den sechziger Jahren. Wie lässt sich diesem Dämpfungseffekt entgegenwirken?

Genau betrachtet müsste die zweite Interpretation des Gemäldes von Dalí noch verfeinert werden. Das Einstein'sche Äquivalenzprinzip – der vollkommen gleiche

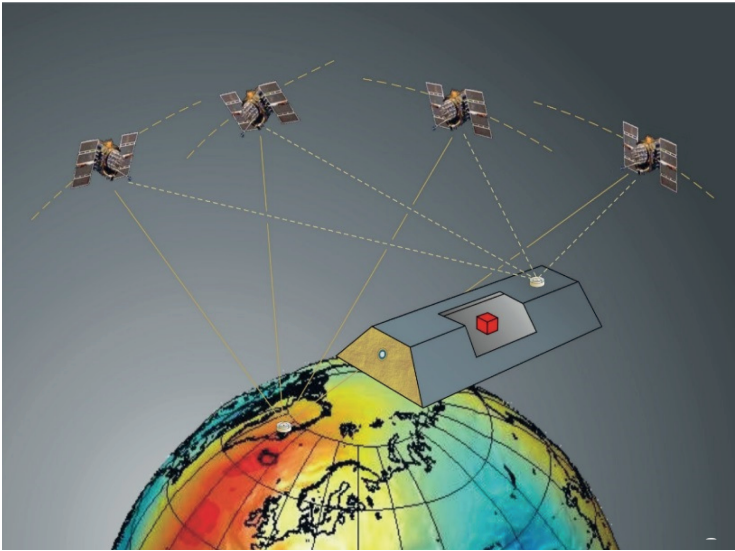


Abbildung 4: Prinzip der Beobachtung eines erdnahen Satelliten mit Hilfe der hoch fliegenden Satelliten des Globalen Positionierungssystems GPS; die rote Testmasse im Satelliten symbolisiert ein Mikroakzelerometer zur Erfassung der auf den Satelliten wirkenden nicht-gravitativen Kräfte.

Fall von Apfel und Marmorblöcken – gilt theoretisch nur in einem Punkt, d.h. der Apfel und die vier Marmorblöcke müssten zu einer Punktmasse verschmelzen. In Wirklichkeit „fühlt“ jede der fünf fallenden Massen an ihrem Ort die Anziehung der umringenden Erdmassen ein klein wenig anders: die Unterschiede sind sehr, sehr klein, aber eben nicht vernachlässigbar klein. Die Situation ist vergleichbar mit der Aussage, die Wirkung des Gravitationsfelds der Erde auf die linke Hand sei ein klein wenig anders als die auf die rechte Hand. Die Aussage ist korrekt, die Differenz ist jedoch extrem klein, weniger als 1 Millionstel von „g“, aber sie lässt sich messen und ist der Schlüssel zu einer detaillierten Rekonstruktion der Erdanziehung vom Weltraum aus.

Mit der ESA Schwerefeldmission GOCE (2009–2013) wurde dieses Prinzip erstmals erprobt. Zentrales Messinstrument des Satelliten ist ein Gravitationsgradiometer, d.h. die simultane Messung der Erdanziehung an mehreren Stellen im Inneren eines Satelliten. Es lässt sich leicht nachvollziehen, dass die untere, d.h. die „erdnähere“ Probemasse die Anziehung eines Gebirgsblocks auf der Erde etwas stärker fühlt als die „erdfernere“, und die auf eine Probemasse im vorderen Bereich des Satelliten gerichtete Erdanziehung etwas anders wirkt als auf eine im hinteren Teil. Aus diesen kleinen Unterschieden wurde das Gravitationsfeld

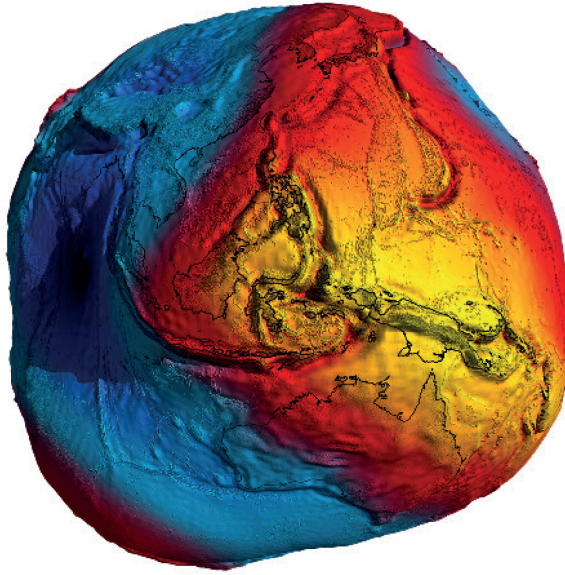


Abbildung 5: Erdfigur, abgeleitet aus den Messungen des Gravitationsgradiometers des ESA-Satelliten GOCE.

der Erde sehr erfolgreich global mit einer bis dahin noch nicht erreichten Genauigkeit abgeleitet. Das Prinzip ist in Abbildung 7 (oben) dargestellt, eine nähere Beschreibung wird in (Floberghagen u.a., 2011 und Rummel u.a., 2011) gegeben.

Mit GOCE konnte erstmals die geometrische Figur der Erde detailgenau vermessen werden, so wie es Gauß vielleicht schon im 19. Jahrhundert vorschwebte. GOCE konnte bestätigen, dass das Geoid einer ellipsoidischen Figur im hydrostatischen Gleichgewicht grundsätzlich sehr nahe kommt. Doch diese Erkenntnis ist heute weit weniger interessant als die vielen sichtbaren Unregelmäßigkeiten. Sie werden in der Geodäsie als Geoidundulationen oder –anomalien bezeichnet. Bereits Gauß (1828, S. 49) spekuliert hierüber, indem er obige Definition der Erdfigur folgendermaßen ergänzt: „Die Richtung der Schwere an jedem Punkte wird aber durch die Gestalt des festen Theils der Erde und seine ungleiche Dichtigkeit bestimmt, und an der äusseren Rinde der Erde, von der allein wir etwas wissen, zeigt sich diese Gestalt und Dichtigkeit als höchst unregelmässig; die Unregelmässigkeit der Dichtigkeit mag sich leicht noch ziemlich tief unter die äussere Rinde erstrecken, und entzieht sich ganz unsern Berechnungen, zu welchen fast alle Daten fehlen. Die geometrische Oberfläche ist das Product der Gesamtwirkung dieser ungleich vertheilten Elemente, und anstatt vorkommende unzweideutige Beweise der Unregelmässigkeit befremdend zu finden, scheint es eher zu bewundern, dass

*sie nicht noch grösser ist.*“ Gauß führte auf dem Brocken im Harz astronomische Messungen zur Bestimmung der Lotrichtung durch. Er verglich die astronomisch bestimmte Lotrichtung (= Vertikale) mit der aus der Triangulation abgeleiteten geodätischen Lotrichtung (der Normalrichtung auf der ellipsoidischen Rechenfläche) und konstatierte eine Differenz, man spricht von Lotabweichung, die *geringer* ausfällt als erwartet, geringer nämlich als die aus der sichtbaren Topographie mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes errechnete Lotabweichung. Übrigens ist dies eine Beobachtung, die auch seinen Zeitgenossen und Freund Alexander von Humboldt (1851, S. 640) beschäftigte. Von Humboldt analysierte die während der Gradmessung der Französischen Akademie der Wissenschaften in Peru von La Condamine durchgeführte und von Bouguer analysierte Bestimmung der Lotabweichung am Chimborazo und kommt zu einem ähnlichen Schluss wie Gauß, dass nämlich die tatsächliche Lotabweichung wesentlich kleiner ausfällt als die theoretisch aus den Gebirgsmassen errechnete. Als eine der Erklärungen wurden damals von einigen Wissenschaftlern „große Höhlungen des colossalen Trachytberges“ postuliert. Erst ein halbes Jahrhundert später entstanden Theorien zur Kompensation der topographischen Massen in Erdkruste und Erdmantel, zur sogenannten Isostasie, (Watts, 2001). Das Gewicht der Gebirgsmassen liegt nicht einfach auf der Erdkruste auf, seine Last wird in Kruste und Mantel kompensiert. Diese Kompensation erklärt, warum die tatsächlichen Geoidundulationen viel kleiner sind als die aus den topographischen Massen errechneten. Mit den Ergebnissen von GOCE steht nun ein großer Schatz von gleichmäßig genauen Geoid- und Schweredaten zur Verfügung, insbesondere auch für Gebiete, für die bisher nur sehr lückenhaftes und ungenaues Datenmaterial verfügbar war.

So entstand mit den Ergebnissen von GOCE erstmals eine zuverlässige Datengrundlage zur Erforschung der unter einem dicken Eispanzer verborgenen Geodynamik der Antarktis. Ferraccioli u.a. (2011) benutzten die Ergebnisse von GOCE, um die Gebirgsbildung um das Gamburtsevgebirge zu untersuchen. Über einen Vergleich von GOCE-Schweregradienten und Topographie konnten McKenzie u.a. (2015) zeigen, dass die Biegesteifigkeit der Lithosphäre unter der Westantarktis signifikant anders ist als die unter der Ostantarktis. Generell ist mit den Gravitationsgradienten aus GOCE ein wichtiges neues Werkzeug der geophysikalischen Modellierung entstanden (Bouman u.a., 2016).

Bei seiner Definition der Erdfigur sagt Gauß: *„Was wir im geometrischen Sinn Oberfläche der Erde nennen, ist nichts anderes als diejenige Fläche, welche überall die Richtung der Schwere senkrecht schneidet, und von der die Oberfläche des Weltmeeres einen Theil ausmacht.“* Diese Aussage war in Anbetracht der damaligen Genauigkeiten korrekt. Tatsächlich wissen wir heute, dass auch die von Wellen und Gezeiten befreite Ozeanoberfläche keine Äquipotentialfläche ist. Die Abweichungen vom Geoid sind klein, in den Zentren der Ozeanströmungssysteme maximal ein oder zwei Meter, jedoch signifikant. In Analogie mit der Topographie der Kontinente spricht man von einer Topographie der Ozeane.

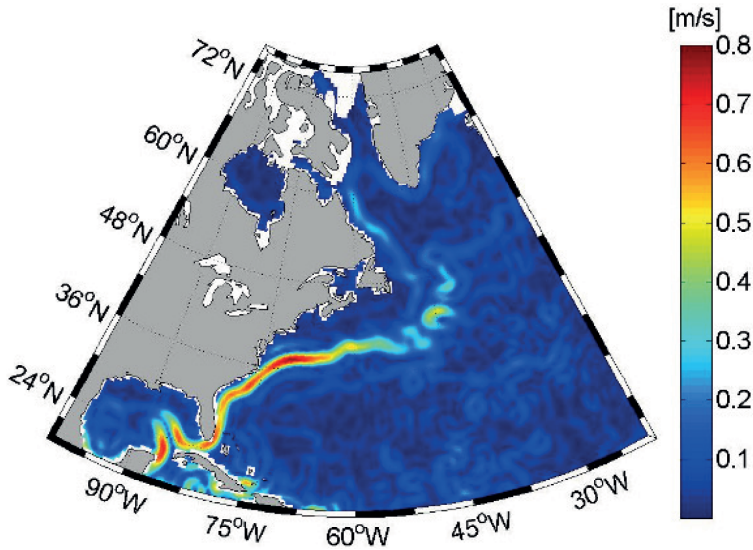


Abbildung 6: Geostrophische Geschwindigkeiten der Meeresströmungen im Nordatlantik, abgeleitet aus der altimetrischen Meeresoberfläche DTU2010 und einem Geoidmodell aus GOCE-Daten .

Ähnlich den Hoch- und Tiefdruckgebieten der Atmosphäre gibt es Höhen und Tiefen der Ozeane. Auf der nördlichen Hemisphäre bewegen sich die Ozeanmassen im Uhrzeigersinn entlang der Schichtlinien dieser Ozeanhöhen, im Gegenuhrzeigersinn auf der Südhalbkugel. Die Meerestopographie wird aufrechterhalten durch das Gleichgewicht des von ihr erzeugten Druckes und den Corioliskräften, man spricht von einem geostrophischen Gleichgewicht. Aus der Meerestopographie leiten sich die Geschwindigkeiten und Richtungen der Ozeanströmungen ab, (Rio u.a., 2014a und 2014b) und damit sehr wichtige Informationen über den Massen- und Wärmetransport in den Weltmeeren. In Abbildung 6 sind die geostrophischen Geschwindigkeiten im Nordatlantik dargestellt. Sie wurden aus einem Geoidmodell von GOCE und einem Meeresoberflächenmodell aus Satellitenaltimetrie gewonnen.

Über das Prinzip der Gradiometrie wurde es erstmals möglich, mit Satelliten ein sehr detailgenaues Abbild der Variationen der Erdanziehung zu schaffen. Die von Gauß definierte geometrische Figur der Erde wurde messbar. Gleichzeitig entstand der Wunsch noch einen Schritt weiterzugehen. Wäre es vor dem Hintergrund des Klimawandels machbar, zeitliche Veränderungen des Geoids zu detektieren; Veränderungen, wie sie zum Beispiel durch Verlagerungen von Eis- und Wassermassen im Erdsystem verursacht werden? Könnte man gar das Gewicht dieser



Massenverlagerungen feststellen? Während die räumlichen Geoidundulationen eine Größenordnung von ca. -100m und +80m haben, betragen die zeitlichen Veränderungen nur wenige Millimeter.

Im Gravitationsgradiometer werden Schweredifferenzen zwischen benachbarten Probemassen innerhalb eines Satelliten gemessen, Abbildung 7 (oben). Im Fall von GOCE sind deren Abstände nur ca. 50cm. Bei der 2002 gestarteten NASA-Mission GRACE, übrigens mit deutscher Beteiligung, betrachtet man die Schweredifferenz zwischen zwei sich folgenden Satelliten; der Abstand der beiden Satelliten ist dabei ca. 200 km, Abbildung 7 (unten). Ein Gradiometer mit einer Armlänge von 50 cm wird demnach ersetzt durch eines mit einer Armlänge von 200 km. Durch diesen Kunstgriff tauscht man die räumliche Detailgenauigkeit ein gegen die zeitliche (Tapley u.a., 2004). Mit diesem Ansatz wird seither das großräumige Muster einer großen Anzahl von Prozessen, die mit Massenverlagerungen im Erdsystem einhergehen, sichtbar und messbar gemacht: Trockenperioden, Überschwemmungen, starke Entnahme von Grundwasser in der Landwirtschaft Nordindiens oder Kaliforniens, das Abschmelzen von Gletschern und Eiskappen, der Anstieg des Meeresspiegels. Eine sehr lesenswerte Übersicht bieten Wouters u.a., (2014). Ein herausragendes Beispiel ist die Eismassenbilanz Grönlands und der Antarktis. In einem großangelegten Experiment konnten erstmals die Resultate der GRACE-Gravimetrie mit regionalen Klimamodellen und den Ergebnissen der Höhenmessung in Übereinstimmung gebracht werden (Shepherd u.a., 2012). Das Ergebnis zeigt einen großen und sich beschleunigenden Eismassenverlust Grönlands, er beträgt momentan jährlich 142 Gigatonnen (Gt), einen etwas geringeren in der Westantarktis und auf der antarktischen Halbinsel (zusammen 85 Gt/Jahr), dem nur ein geringfügiger Eismassenzuwachs in der Ostantarktis (14 Gt/Jahr) gegenübersteht.

Der Eismassenverlust in Grönland und der Antarktis muss sich widerspiegeln in einem entsprechenden Masseneintrag in die Ozeane und damit einem Anstieg des Meeresspiegels. Auch hier ist durch GRACE die Bilanzierung und Ursachenforschung enorm vorangekommen. Mit Radarhöhenmessung wird schon seit fast 30 Jahren der Anstieg des Meeresspiegels vom Weltraum aus gemessen. Ein großer Beitrag des Anstiegs kommt dabei vom Abschmelzen der Gletscher und der Eisschilde Grönlands und der Antarktis. Er führt zu regional sehr unterschiedlichen Veränderungen des Geoids und wird von GRACE erfasst. Ein zweiter, ebenfalls sehr wesentlicher Beitrag ist eine direkte Folge der globalen Erwärmung der Ozeane, nämlich deren Wärmeausdehnung. Aber dieser Anteil ist mit GRACE nicht messbar, denn dieser thermo-sterische Anteil verändert das Schwerfeld der Erde kaum. Die Erfassung dieser Komponente erfolgt über das rein ozeanographische ARGO-Messsystem. Es besteht aus mehreren Tausend global über die Weltmeere verteilte Messbojen, mit denen Druck, Salzgehalt und Temperatur bis in eine Tiefe von 2000 Metern gemessen werden. So konnte eine Bilanzierung durchgeführt werden: der momentane Gesamtanstieg des Meeresspiegels von

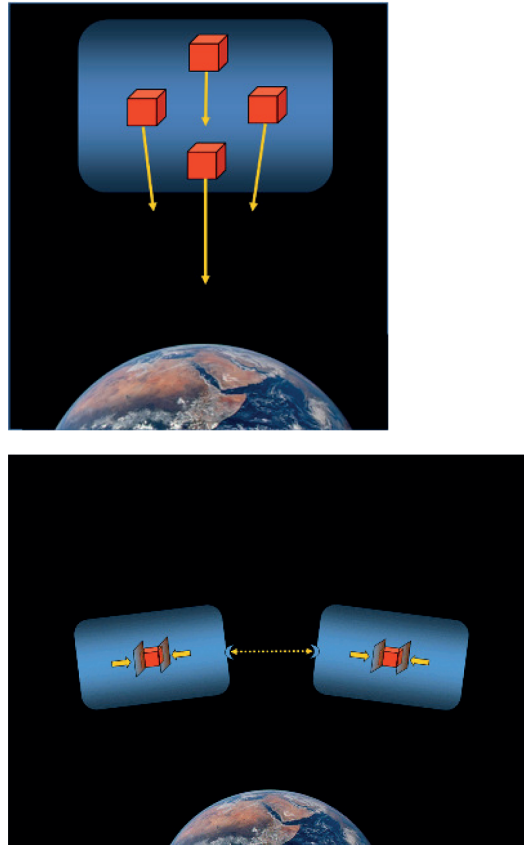


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Prinzips der Satellitenmissionen GOCE (oben) und GRACE (unten) – Das GOCE-Gradiometer mit mehreren Testmassen (rot) im Inneren, die untere Testmasse wird von den Massen der Erde stärker angezogen als die obere; die Anziehung auf die linke Testmasse ist anders gerichtet als die auf die rechte, der Abstand der Testmassen beträgt nur 50cm – die GRACE-Mission besteht aus zwei im Abstand von 200 km die Erde umkreisende Satelliten, jeder der Satelliten enthält eine Testmasse, die Abstandsvariationen zwischen den beiden Satelliten werden mikrometergenau gemessen.

3.0 mm/J, immerhin 30 cm pro Jahrhundert, setzt sich zusammen aus 1.8 mm/J als Folge des Masseneintrags von Gletschern und Eisschilden in die Ozeane und 1.1 mm/J als Folge der thermischen Ausdehnung der Ozeane (Chambers u.a., 2006, siehe auch Church u.a., 2013 und Cazenave u.a., 2014). Es wird angenommen, dass die fehlenden 0.1 mm/J durch eine verstärkte kontinentale Wasserspeicherung zustande kommen.



GRACE misst die zeitlichen Veränderungen des Geoids und erschloss damit eine neue, sehr wertvolle Datenquelle für die Klimaforschung. Allerdings ist die Messanordnung mit den beiden sich folgenden Satelliten sehr unsymmetrisch: in Flugrichtung sehr genau, quer zur Flugrichtung mit relativ großen Messunsicherheiten. Die Folge ist eine ausgeprägte Streifenbildung in den Daten. Die besprochenen Ergebnisse sind nur nach einer ausgeklügelten Filterung erreichbar (z.B. Kusche, 2007), wobei das gebräuchlichste Filter den Namen von Gauß trägt: seine berühmte Glockenkurve hat für diese Anwendung besonders günstige mathematische Eigenschaften. Dennoch lässt sich ein Informationsverlust nicht vermeiden, der vor allem dazu führt, dass nur großräumige zeitliche Veränderungen reproduzierbar sind und sich in Küstennähe die Signale von Land- und Ozeanprozessen vermischen.

Die von GRACE erbrachten Resultate sind beeindruckend und für die Klimaforschung von enormen Wert. Die GRACE-Mission, ursprünglich für eine Laufzeit von fünf Jahren konzipiert (von 2002 bis 2007), befindet sich erst jetzt in ihrer Endphase. Für die Klimaforschung sind jedoch kontinuierliche Messreihen unabdingbar. Nur mit Serien, die sich über 30 Jahre und länger erstrecken, werden Klimasignale zweifelsfrei erkennbar. Es wird daher momentan intensiv über Konzepte zukünftiger Missionen nachgedacht (Panet u.a., 2013). Wünschenswert wäre eine noch genauere Bestimmung des Geoids bei einer gleichzeitigen Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Auflösung.

Der wohl wichtigste „Denktank“ zur Entwicklung der technologischen und methodischen Voraussetzungen für eine zukünftige Mission ist mit dem Sonderforschungsbereich der Deutschen Forschungsgemeinschaft SFB 1128 Geo-Q in Hannover (Sprecher Professor Jakob Flury, 2012) und seinen Ablegern in Braunschweig und in Bremen geschaffen worden. Ein wichtiges Stichwort lautet dabei „Quantengravimetrie und Quantengradiometrie“, d.h. die Anwendung der in diesem Vortrag besprochenen Messprinzipien, nicht auf herkömmliche Probemassen sondern auf frei fallende Ansammlungen „kalter Atome“. Genutzt werden Quanteneffekte; die bisherigen Entwicklungen sind vielversprechend (Sorrentino u.a., 2011, Carraz u.a., 2014). Vor kurzem wurden in den USA von der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA innovative Missions- und Technologiekonzepte für Wissenschaftsmissionen der Zukunft ausgewählt. Von 11 ausgewählten Projekten beschäftigen sich zwei mit dem Thema Gravitation. Ein Vorschlag befasst sich mit der simultanen Messung des differentiellen freien Falls einer Ansammlung von frei fallenden Probemassen, in diesem Fall zur Bestimmung des Gravitationsfelds von Asteroiden, (Cosmic Concept: Visiting Asteroids with fleets of nanoprobes, <http://www.popularmechanics.com>). Auch ein derartiges Konzept wäre eventuell übertragbar auf die Erde, z.B. die interferometrische Vermessung der Bahnbewegung eines Schwarms von Mikrosatelliten von einem Referenzsatelliten aus.



Abbildung 8: Gemälde „Galatea“ von Savador Dalí  
 © Salvador Dalí, Fundació Gala-Salvador Dalí, Figueres, 2014

Hier schließt sich irgendwie der Kreis. In Zukunft wird versucht werden, simultan den freien Fall einer größeren Ansammlung von Probekörpern zu erfassen, entweder „konventionell“ oder unter Nutzung von Quanteneffekten. Mit einem weiteren Gemälde, „Galatea“ hat Salvador Dalí gezeigt, wie sich aus der Betrachtung einer Vielzahl von sphärischen Einzelmassen ein Antlitz ergibt, das der schönen Galatea, der Tochter des Eurytios, Abbildung 8.

1977 wurde Helmut Moritz von der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft mit der Gauß-Medaille ausgezeichnet. Professor Moritz hat mit seinen bahnbrechenden Arbeiten ein modernes – gleichzeitig zeitloses – theoretisches Fundament der heutigen Geodäsie geschaffen. In seinem Buch „Geometry, Relativity and Geodesy“ (zusammen mit B Hoffmann-Wellenhof, 1993) spannt er den Bogen von der Gaußschen Geometrie krummliniger Koordinaten zur relativistischen Geometrie der Raumzeit. Man könnte dieses Buch als theoretisches Programm betrachten, auf dem sich nun von den Geodäten und Physikern des Sonderforschungsbereichs Geo-Q eine Geodäsie der nächsten Generation aufbauen lässt. Statt des berühmten Dreiecks Braunschweig – Göttingen – Hannover der Gaußschen Periode, wäre es dann das Dreieck Hannover, Braunschweig und Bremen.

Mein aufrichtiger Dank geht an meine Kollegen und Wegbegleiter, die Professoren Nico Sneeuw, Markus Rothacher und Jürgen Müller für ihre großartigen Beiträge zum Kolloquium. Ich bedanke mich auch bei allen ehemaligen Studierenden, Doktoranden und Mitarbeitern; der Gedankenaustausch mit ihnen war zweifellos die wertvollste Inspiration für meine eigenen Arbeiten.

## Literatur

BERNARD, A., J.P. CANNY, R. JUILLERAT & P. TOUBOUL (1985): Electrostatic suspension of samples in microgravity, *Acta Astronautica*.

BOUMAN, J., J. EBBING, M. FUCHS, J. SEBERA, V. LIEB, W. SZWILLUS, R. HAAGMANS & P. NOVAK (2016): Satellite gravity gradient grids for geophysics. – *Sci. Rep.* 6, 21050, doi:10.1038/srep21050.

CARRAZ, O., C. SIEMES, L. MASSOTTI, R. HAAGMANS & P. SILVESTRI (2014): A spaceborne gravity gradiometer concept based on cold atom interferometers for measuring Earth's gravity field. – *Microgravity Science and Technology*, 26(3), 139–145, DOI: 10.1007/s12217-014-9385-x.

CAZENAVE, A., H.-B. DIENG, B. MEYSSIGNAC, K. VON SCHUCKMANN, B. DECHARME & E. BERTHIER (2014): The rate of sea level rise. – *Nature Climate Change* 4: 358–361, 2014, DOI:10.1038/nclimate2159.

CHAMBERS, D.P. (2006): Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry. – *J. Geophys. Res. (Oceans)* 111 C3010.

CHURCH, J.A., P.U. CLARK, A. CAZENAVE, J.M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, M.A. MERRIFIELD, G.A. MILNE, R.S. NEREM, P.D. NUNN, A.J. PAYNE, W.T. PFEFFER, D. STAMMER, A.S. UNNIKRISHNAN (2013): Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX & P.M. MIDGLEY (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CREUTZFELDT, B., A. GÜNTNER, T. KLÜGEL & H. WZIONTEK (2008): Simulating the influence of water storage changes on the superconducting gravimeter of the Geodetic Observatory Wettzell. – *Germany, Geophysics*, 73(6). DOI: 10.1190/1.2992508.

FERRACCIOLI, F., C.A. FINN, T.A. JORDAN, R.E. BELL, L.M. ANDERSON & D. DAMASKE (2011): East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains. – *Nature* 479: 388–392, DOI:10.1038/nature10566.

FLOBERGHAGEN, R., M. FEHRINGER, D. LAMARRE, D. MUZI, B. FROMMKNECHT, C. STEIGER, J. PIÑEIRO & A. DA COSTA (2011): Mission design, operation

and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission. – *J. Geod* **85**: 749–758, DOI: 10.1007/s00190-011-0498-3.

FLURY, J. (2012): Relativistic geodesy and gravimetry with quantum sensors – modeling, geo-metrology, and future technology, Leibniz Universität Hannover together with Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig and Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation, Bremen, 147 Seiten, Hannover.

GAUSS, C.F. (1828): Bestimmung des Breitenunterschieds zwischen den Sternwarten von Göttingen und Altona durch Beobachtungen am Ramsdenschen Zenithsector, Carl Friedrich Gauß Werke, Band IX, S.49, Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Teubner.

HUMBOLDT, A. VON (1851): Kosmos, Band IV, 640–643.

KLEIN, J. (2007): Festvortrag, Carl Friedrich Gauß in der Walhalla, S. 13–23, Braunschweig.

KUSCHE, J. (2007): Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. – *J. Geod*, **81**(11), 733–749, DOI: 10.1007/s00190-007-0143-3

LISTING, J.B. (1873) : Ueber unsere jetzige Kenntniss der Gestalt und Grösse der Erde, Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften und der G. A. Universität zu Göttingen, 3, S. 33–98.

MANIA, H. (2008): Gauß: Eine Biographie, Rowohlt.

MCKENZIE, D., W. YI & R. RUMMEL (2015): Estimates of  $T_c$  from PreCambrian Shields using GOCE gravity. – *Earth and Planetary Science Letters* **428**: 97–107.

MORITZ, H. & B. HOFMANN-WELLENHOF (1993): Geometry, Relativity, Geodesy, Wichmann, Karlsruhe.

PANET, I., J. FLURY, R. BIANCALE, T. GRUBER, J. JOHANNESSEN, M.R. VAN DEN BROEKE, T. VAN DAM, P. GEGOUT, C.W. HUGHES, G. RAMILLIEN, I. SASGEN, L. SEOANE & M. THOMAS (2013): Earth System Mass Transport Mission (e.motion): A Concept for Future Earth Gravity Field Measurements from Space. – *Surv Geophys* **34**(2): 141–163, DOI 10.1007/s10712-012-9209-8.

PROTHERO, W.A. JR. & J.M. GOODKIND (1968): A superconducting gravimeter: Review of Scientific Instruments, **39**(9): 1257.

REIGBER C., H. LÜHR & P. SCHWINTZER (2002): CHAMP mission status. – *Adv. Space Res.* Vol. **30**(2): 129–134.

RIO, H.-M., A. PASCUAL, P.-M. POULAIN, M. MENNA, B. BARCELÓ & J. TINTORÉ (2014a): Computation of a new mean dynamic topography for the Mediterranean Sea from model outputs, altimeter measurements and oceanographic in situ data. – *Ocean Sci.*, **10**: 731–744, DOI:10.5194/os-10-731-2014.

RIO H.-M., S. MULET & N. PICOT (2014b): Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry and in-situ data provides new

insight into geostrophic and Ekman currents. – *Geophys. Res. Lett.*, **41**; 8918–8925, DOI :10.1002/2014GL061773.

RUMMEL, R., W. YI & C. STUMMER (2011): GOCE gravitational gradiometry. – *J. Geod* **85**:777–790, DOI 10.1007/s00190-011-0500-0.

SHEPHERD, A., E.R. IVINS, A. GERUO, V.R. BARLETTA, M.J. BENTLEY, S. BETTADPUR, K.H. BRIGGS, D.H. BROMWICH, R. FORSBERG, N. GALIN, M. HORWATH, S. JACOBS, I. JOUGHIN, M.A. KING, J.T.M. LENAERTS, J. LI, S.R.M. LIGTENBERG, A. LUCKMAN, S.B. LUTHCKE, M. MCMILLAN, R. MEISTER, G. MILNE, J. MOUGINOT, A. MUIR, J.P. NICOLAS, J. PADEN, A.J. PAYNE, H. PRITCHARD, E. RIGNOT, H. ROTT, L. SANDBERG SØRENSEN, T.A. SCAMBOS, B. SCHEUCHL, E.J.O. SCHRAMA, B. SMITH, A.V. SUNDAL, J.H. VAN ANGELEN, W.J. VAN DE BERG, M.R. VAN DEN BROEKE, D.G. VAUGHAN, I. VELICOGNA, J. WAHR, P.L. WHITEHOUSE, D.J. WINGHAM, D. YI, D. YOUNG & H.J. ZWALLY (2012): A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance. – *Science* **338**.

SORRENTINO, F., K. BONGS, P. BOUYER, L. CACCIAPUOTI, M. DE ANGELIS, H. DITTUS, W. ERTMER, J. HARTWIG, M. HAUTH, S. HERRMANN, K. HUANG, M. INGUSCIO, E. KAJARI, T. KÖNEMANN, C. LÄMMERZAHN, A. LANDRAGIN, G. MODUGNO, F. PEREIRA DOS SANTOS, A. PETERS, M. PREVEDELLI, E.M. RASEL, W.P. SCHLEICH, M. SCHMIDT, A. SENGER, K. SENGSTOCK, G. STERN, G.M. TINO, T. VALENZUELA, R. WALSER & P. WINDPASSINGER (2011): The Space Atom Interferometer project: status and prospects. – *Journal of Physics: Conference Series* **327**: 012050, DOI:10.1088/1742-6596/327/1/012050.

TAPLEY, B.D., S. BETTADPUR, J.C. RIES, P.F. THOMPSON & M.M. WATKINS (2004): GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System – *Science* **305**: 503, DOI: 10.1126/science.1099192.

WATTS, A.B. (2001): *Isostasy and flexure of the lithosphere*. – Cambridge University Press

WOUTERS, B., J.A. BONIN, D.P. CHAMBERS, R.E.M. RIVA, I. SASGEN & J. WAHR (2014): GRACE, time-varying gravity, Earth system dynamics and climate change – *Rep. Prog. Phys.* **77**: s116801 (41pp), DOI:10.1088/0034-4885/77/11/116801.